

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**ДО ВИКОНАННЯ ДОМАШНЬОГО ЗАВДАННЯ**  
**«РОЗРАХУНОК І ОПТИМІЗАЦІЯ ОРЕБРЕНОЇ ПОВЕРХНІ»**  
з курсу « ТЕПЛО- І МАСООБМІН»  
для студентів фахів 7.090510 «Теплоенергетика»  
і 7.000008 «Енергетичний менеджмент»

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол № 3 від 21.12.07.

Харків НТУ «ХПІ» 2008

Методичні вказівки до виконання домашнього завдання «Розрахунок і оптимізація обребреної поверхні» по курсу «Тепло- і масообмін» для студентів фахів 7.090510 «Теплоенергетика» і 7.000008 «Енергетичний менеджмент» / уклад. Р.Г. Акмен, Т.Б. Подвальная – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 9с.

Укладачі: Р.Г. Акмен  
Т.Б. Подвальная

Рецензент О.О. Шевелев

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

Інтенсифікація теплопереносу в процесі теплопередачі може бути досягнута нарощуванням поверхні тепловіддачі з боку теплоносія з низькою інтенсивністю теплообміну (звичайно з боку газоподібного теплоносія). Це робиться за допомогою прямих або кільцевих (на циліндричних поверхнях) ребер, що зроблені з того ж матеріалу, що і стінка (або з іншого матеріалу), та приварені або щільно насаджені на поверхню стінки.

## **1. Визначення щільності теплового потоку крізь плоску оребрену стінку**

При оребренні плоскої стінки використовують, як правило, або стрічкові ребра постійної чи змінної товщини по висоті ребра, або окремі гольчаті виступи (шипи). Найбільш поширені стрічкові ребра, які будуть розглянуті далі.

### **1.1. Розрахунок геометричних характеристик оребрення і ефективності ребра**

Основна геометрична характеристика ребристої поверхні – коефіцієнт оребрення, чисельно рівний відношенню оребреної поверхні з боку теплоносія з малою інтенсивністю теплообміну  $F_2$  до гладкої поверхні з боку теплоносія з високою інтенсивністю теплообміну  $F_1$ , тобто

$$\varphi = \frac{F_2}{F_1}. \quad (1.1)$$

Для прямих ребер постійного перерізу (рис.1) товщиною  $2\delta$  і висотою  $h$ , що розташовані з кроком  $S$ , коефіцієнт оребрення

$$\varphi = \frac{S + 2h}{S}. \quad (1.2)$$

Для трикутних ребер (рис.2) товщиною в основі  $2\delta$  коефіцієнт оребрення

$$\varphi = \frac{(S - 2\delta) + 2\sqrt{h^2 + \delta^2}}{S}, \quad (1.3)$$

або, якщо врахувати, що для більшості конструкцій звичайно  $h \gg \delta$ , з похибкою менше 1 %

$$\varphi = \frac{(S - 2\delta) + 2h}{S}. \quad (1.4)$$

## Розрахункові схеми ребристих поверхней

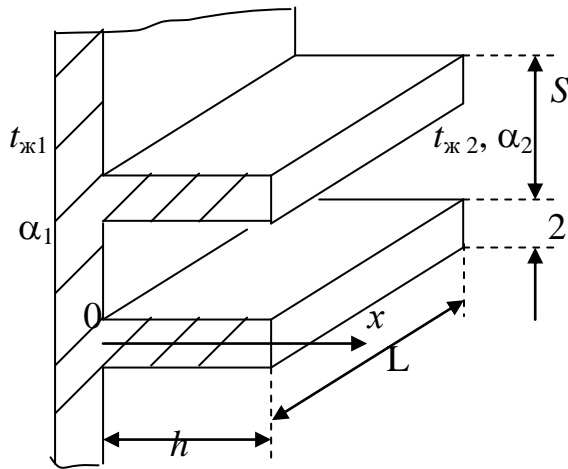


Рисунок 1 – Пряме ребро прямокутного перерізу

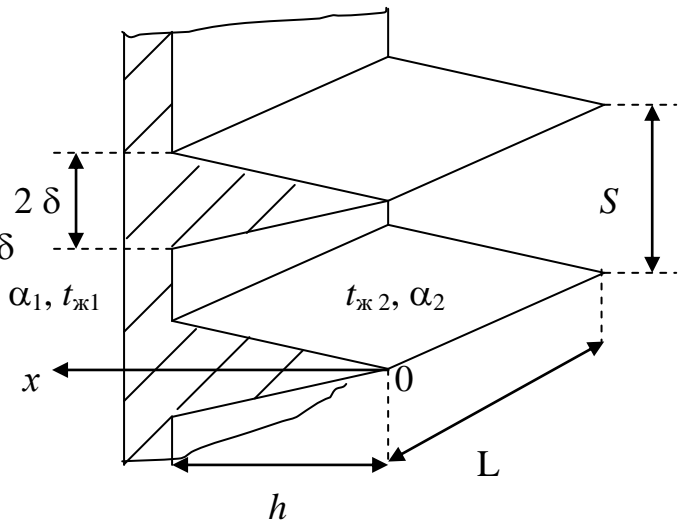


Рисунок 2 – Пряме ребро трикутного перерізу

Зміна температури по висоті ребра приводить до зменшення щільності теплового потоку з поверхні ребра. Тому в оцінці теплової ефективності оребрення використовують поняття ефективності ребра, тобто відношення теплового потоку, переданого ребром насправді, до того теплового потоку, який ребро могло б передати, якби температура всієї його поверхні дорівнювала температурі в основі.

Ефективність прямого ребра прямокутного перерізу знаходиться як

$$\eta = \frac{\text{th}(mh)}{mh}, \quad (1.5)$$

де  $h$  – висота ребра,  $m$  – характеристика ребра, що є мірою відношення теплового потоку з поверхні ребра до теплового потоку по осі ребра, яка, в свою чергу, визначається як

$$m = \sqrt{\frac{\alpha u}{\lambda f}}, \quad (1.6)$$

де  $u$  – периметр ребра,  $f$  – площа перерізу ребра що паралельна стінці. Враховуючи, що для прямого ребра звичайно  $L \gg \delta$ , а  $u = 2L$ ,  $f = 2L\delta$ , де  $L$  – довжина ребра, отримуємо для цього випадку

$$m = \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \delta}}. \quad (1.7)$$

Ефективність прямого ребра трикутного перерізу визначається як

$$\eta = \frac{I_1(2mh)}{mh \cdot I_0(2mh)}, \quad (1.8)$$

де  $I_0(2mh)$  і  $I_1(2mh)$  – модифіковані функції Бесселя першого роду нульового і першого порядку відповідно, значення яких можна знайти в [4] або в додатку (табл.Д.1). Характеристика  $m$  ребра трикутного профілю визначається також по (1.7).

Для заданого ребра прямокутного профілю (подовжній переріз ребра  $F = 2\delta h$ ) слід визначити ефективність ребра трикутного профілю за двох умов: а) при однакових  $\delta$  і  $h$ ; б) при однакових  $F$  і  $h$ . У випадку а) характеристика трикутного й прямокутного ребер однакова, та можна безпосередньо скористатися (1.8). У разі б) потрібно врахувати, що подовжній переріз трикутного ребра  $F = \delta_{\text{тр}} \cdot h$  однаковий з перерізом прямокутного ребра. Тоді  $\delta_{\text{тр}} = 2\delta_{\text{пр}}$ , та слід перерахувати характеристику ребра (1.6) за знайденим значенням напівтовщини трикутного ребра і ефективність ребра по (1.8).

Для заданого ребра трикутного профілю (подовжній переріз ребра  $F = \delta h$ ) слід визначити ефективність ребра прямокутного профілю за двох умов: а) при однакових  $\delta$  і  $h$ ; б) при однакових  $F$  і  $h$ . У випадку а) характеристика трикутного й прямокутного ребер однакова, та можна безпосередньо скористатися (1.5). У разі б) потрібно врахувати, що подовжній переріз прямокутного ребра  $F = 2\delta_{\text{пр}} h$  однаковий з перерізом трикутного ребра. Тоді  $\delta_{\text{пр}} = \delta_{\text{тр}}/2$  і слід перерахувати характеристику ребра (1.6) за знайденим значенням напівтовщини прямокутного ребра і ефективність ребра по (1.5).

Проаналізуйте отримані результати.

## 1.2. Визначення коефіцієнта теплопередачі і щільності теплового потоку

Коефіцієнт теплопередачі через плоску оребрену поверхню в припущенні, що термічним опором самої стінки можна нехтувати, визначається як

$$k_p = \frac{1}{1/\alpha_1 + 1/(\alpha_2 \cdot \varphi \cdot \eta)}. \quad (1.9)$$

Для гладкої стінки без ребер коефіцієнт теплопередачі визначається по відомій залежності (нехтуючи термічним опором стінки):

$$k = \frac{1}{1/\alpha_1 + 1/\alpha_2}. \quad (1.10)$$

Щільність теплового потоку через оребрену стінку

$$q_p = k_p (t_{p1} - t_{p2}), \quad (1.11)$$

а через гладку

$$q = k (t_{p1} - t_{p2}). \quad (1.12)$$

## 2. Розрахунок розподілу температури по висоті ребра

Температура в основі ребра (на координаті  $x = 0$  для ребра прямокутного перерізу і  $x = h$  для ребра трикутного перерізу) може бути визначена як

$$t_0 = t_{p1} - q_p / \alpha_1, \quad (2.1)$$

а перевищення температури

$$\vartheta_0 = t_0 - t_{p2}. \quad (2.2)$$

Розподіл температури по ребру прямокутного перерізу визначається за рівнянням

$$\vartheta(x) = \vartheta_0 \frac{\operatorname{ch}[mh(1 - x/h)]}{\operatorname{ch}(mh)}, \quad (2.3)$$

а для ребра трикутного перерізу

$$\vartheta(x) = \vartheta_0 \frac{I_0(2mh\sqrt{x/h})}{I_0(2mh)}, \quad (2.4)$$

де  $\vartheta(x) = t(x) - t_{p2}$ .

Після розрахунку температури в точках  $x/h = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$  слід побудувати графік розподілу температури по висоті ребра. Врахуйте напрям осі  $x$  по рис.1 і 2.

## 3. Визначення оптимальних розмірів ребра

Оптимальним називають ребро тієї ж ваги, що й задане, але яке передає максимальний тепловий потік з одиниці довжини.

Площа подовжнього перерізу ребра прямокутного профілю при заданих розмірах становить  $F = 2\delta h$ . Це значення повинне залишатися постійним. Тоді напівтовщина ребра оптимальних розмірів

$$\delta_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{F^2 \alpha_2}{4k_{\text{опт}}^2 \lambda}}, \quad (3.1)$$

де  $k_{\text{опт}} = m_{\text{опт}} \cdot h_{\text{опт}} = 1,4192$ . Визначивши  $\delta_{\text{опт}}$  по (3.1), висоту ребра оптимальних розмірів знайдемо як  $h_{\text{опт}} = F/(2\delta_{\text{опт}})$ , а характеристику ребра оптимальних розмірів  $m_{\text{опт}} = 1,4192/h_{\text{опт}}$ .

Тепловий потік, що передається одиницею довжини ребра постійного профілю можна визначити за рівнянням

$$q_l = 2\vartheta_0 \sqrt{\alpha_2 \lambda \delta} \operatorname{th}(mh). \quad (3.2)$$

Для ребра трикутного профілю площа подовжнього перерізу, при заданих розмірах ребра становить  $F = \delta h$ , і також повинна залишатися постійною. Напівтовщина трикутного ребра оптимальних розмірів

$$\delta_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{4F^2\alpha_2}{k_{\text{опт}}^2\lambda}}, \quad (3.3)$$

де  $k_{\text{опт}} = 2m_{\text{опт}} \cdot h_{\text{опт}} = 2,6188$ . Визначивши  $\delta_{\text{опт}}$  по (3.3), висоту трикутного ребра оптимальних розмірів знайдемо як  $h_{\text{опт}} = F/\delta_{\text{опт}}$ , а характеристику ребра оптимальних розмірів  $m_{\text{опт}} = 2,6188/(2 h_{\text{опт}})$ .

Тепловий потік, що передається з одиниці довжини ребра трикутного профілю, визначається як

$$q_l = 2\theta_0 \sqrt{\alpha_2 \lambda \delta} \frac{I_1(2mh)}{I_0(2mh)}. \quad (3.4)$$

#### 4. Зміст домашнього завдання

Вихідні дані вибрати з наведеної нижче таблиці, варіант розрахунку приймається за порядковим номером студента в академічному журналі групи. Для групи «4» коефіцієнт теплопровідності ребра прийняти за чисельником у відповідній графі таблиці, для групи «7» – за знаменником. Для групи «7» тип ребра (останній стовбець таблиці) змінити на протилежний.

Для плоскої оребреної стінки за заданих умов теплообміну, температур середовищ, розмірів і форми ребра (прямокутне або трикутне) визначити:

- 1) Коефіцієнт оребрення.
- 2) Ефективність ребра заданого типу й ребра другого типу при умовах:  
а) однакові основні розміри ребер ( $h$  і  $\delta$ ); б) однакова висота ребра й площа його подовжнього перерізу ( $h$  і  $F$ ).
- 3) Коефіцієнт теплопередачі й щільність теплового потоку через оребрену й не оребрену стінку.
- 4) Побудувати графік розподілу температури по висоті ребра, розрахувавши температуру в точках з відносними координатами  $x/h = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$ .
- 5) Оптимальні розміри ребра.
- 6) Тепловий потік, що передається з одиниці довжини ребра заданих розмірів і ребра з оптимальними розмірами.

#### Контрольні запитання до завдання

1. В яких випадках доцільно оребрення поверхні теплопередачі.
2. Дайте визначення такого тіла, як ребро або стрижень.
3. Дайте визначення коефіцієнта оребрення.
4. Запишіть вираз характеристики ребра.
5. Фізичний сенс характеристики ребра.
6. Дайте визначення ефективності ребра.
7. Що розуміється під «оптимальними розмірами ребра»?

Таблиця – Вхідні дані

№ п/п	Розміри ребра, мм			$\lambda$ , Вт/(мК)	$t_{p1}$ , °С	$\alpha_1$ , Вт/(м²К)	$t_{p2}$ , °С	$\alpha_2$ , Вт/(м²К)	Тип ребра
	2 $\delta$	$h$	$S$						
1	6	50	25	40/80	100	500	20	10	Пр.
2	5	45	20	40/80	100	600	21	15	Тр.
3	4	40	20	40/80	100	700	22	20	Пр.
4	3	25	15	40/80	100	800	23	25	Тр.
5	4	35	20	20/40	120	900	20	20	Пр.
6	3	30	15	20/40	120	1000	21	25	Тр.
7	2	20	12	20/40	120	1200	22	30	Пр.
8	3	25	15	30/60	180	1300	20	20	Тр.
9	2	20	12	30/60	180	1400	21	15	Пр.
10	1	12	10	30/60	180	1600	22	30	Тр.
11	2	25	12	35/80	150	1700	20	20	Пр.
12	1	12	10	35/80	150	1800	21	30	Тр.
13	0,5	6	5	35/80	150	1900	25	45	Пр.
14	1	12	10	50/100	100	1000	20	45	Тр.
15	0,5	5	5	50/100	100	1100	21	50	Пр.
16	0,4	5	3	50/100	100	1200	22	80	Тр.
17	0,5	6	5	80/170	120	1300	23	100	Пр.
18	0,4	5	3	80/170	120	1400	24	90	Тр.
19	0,3	4	3	80/170	120	1500	25	120	Пр.
20	1	15	3	50/100	90	800	20	100	Тр.
21	2	12	3	50/100	90	900	22	150	Пр.
22	3	10	4	50/100	90	1000	24	130	Тр.
23	4	25	10	20/40	70	1300	20	20	Пр.
24	3	40	15	20/40	70	1400	23	15	Тр.
25	5	30	12	20/40	70	1600	26	30	Пр.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981.
2. Шнейдер Г. Инженерные проблемы теплопроводности. – М.: ИЛ, 1960.
3. Акмен Р. Г. Тепло- и массообмен: текст лекций. – Харьков.: НТУ «ХПИ», 2006.
4. Сегал Б.И., Семендяев К.А. Пятизначные математические таблицы.– М.: Физматгиз, 1958.



Таблиця Д.1 – Модифіковані функції Бесселя першого роду

$x$	$I_0(x)$	$I_1(x)$	$x$	$I_0(x)$	$I_1(x)$	$x$	$I_0(x)$	$I_1(x)$
0,30	1,02263	0,15169	1,20	1,39373	0,71468	2,10	2,44630	1,74550
0,35	1,03086	0,17769	1,25	1,43047	0,75528	2,15	2,53560	1,82080
0,40	1,04040	0,20403	1,30	1,46928	0,79733	2,20	2,62010	1,91410
0,45	1,05147	0,23074	1,35	1,51023	0,84090	2,25	2,72710	2,00400
0,50	1,06348	0,25789	1,40	1,55340	0,88609	2,30	2,82690	2,09780
0,55	1,07707	0,28553	1,45	1,59886	0,93298	2,35	2,93690	2,19850
0,60	1,09205	0,31370	1,50	1,64672	0,98167	2,40	3,04930	2,29810
0,65	1,10845	0,34247	1,55	1,69710	1,03224	2,45	3,16680	2,40500
0,70	1,12630	0,37188	1,60	1,75000	1,08481	2,50	3,28980	2,51670
0,75	1,14565	0,40199	1,65	1,80560	1,13948	2,55	3,41860	2,62340
0,80	1,16631	0,43286	1,70	1,86400	1,19635	2,60	3,5533	2,7554
0,85	1,18895	0,46456	1,75	1,92530	1,25554	2,65	3,6942	2,8829
0,90	1,21299	0,49713	1,80	1,98960	1,31717	2,70	3,8417	3,0161
0,95	1,23868	0,53064	1,85	2,05700	1,38136	2,75	3,9959	3,1554
1,00	1,26607	0,56516	1,90	2,12770	1,44824	2,80	4,1573	3,3011
1,05	1,29521	0,60075	1,95	2,20190	1,51796	2,85	4,3261	3,4533
1,10	1,32616	0,63749	2,00	2,27960	1,59064	2,90	4,5027	3,6126
1,15	1,35898	0,67544	2,05	2,36100	1,66640	2,95	4,6875	3,7792

Навчальне видання

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**ДО ВИКОНАННЯ ДОМАШНЬОГО ЗАВДАННЯ**  
**«РОЗРАХУНОК ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОРЕБРЕНОЇ ПОВЕРХНІ»**  
з курсу “ТЕПЛО- ТА МАСООБМІН”

для студентів фахів 7.090510 “Теплоенергетика”,  
і 7.000008 “Енергетичний менеджмент”

Укладачі: АКМЕН Роберт Генріхович  
ПІДВАЛЬНА Тетяна Борисівна

Відповідальний за випуск В.М. Кошельник

Роботу до видання рекомендував Ю. В. Шульгін

Редактор М.П. Єфремова

План 2008р., поз. 62/

Підп. до друку \_\_\_\_\_ Формат 60x84 1/16. Папір офсетн. Друк – ризографія.  
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 0,75. Обл.- вид.арк. 0,8. Тираж 100 прим.  
Зам. \_\_\_\_\_. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ „ХПІ” 61002, Харків 2, вул. Фрунзе, 21  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000р.

---

Друкарня НТУ „ХПІ”, 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21